

化工连续生产工艺安全联锁系统缺陷整改对策

高 飞

新疆东明塑胶有限公司 新疆 昌吉 831100

【摘 要】：安全联锁系统是化工连续生产装置防止过程偏离安全范围、避免重大事故的关键保护层。然而，部分企业安全联锁系统在设计、实施、运维及变更管理等环节存在系统性缺陷，导致“关键防线”形同虚设。本文从硬件配置、逻辑设计、运维管理和变更控制四个维度系统梳理了化工连续生产装置安全联锁系统的典型缺陷类型，结合近年来典型事故案例剖析了缺陷形成的深层原因——设计源头把关不严、功能安全标准执行偏差、运维管理体系缺位、变更管理失控等。在此基础上，提出了涵盖单点联锁治理、逻辑结构优化、全生命周期 SIL 验证、变更管理闭环、运维制度完善五方面的系统性整改对策。研究表明，安全联锁系统缺陷整改必须从碎片化修补转向体系化重构，将功能安全理念贯穿于系统设计、工程实施、运行维护和变更改造的全过程，方能从根本上消除联锁失效隐患，保障化工连续生产装置的长周期安全运行。

【关键词】：化工连续生产；安全联锁系统；功能安全；整改对策

DOI:10.12417/3083-5526.25.11.008

1 引言

化工连续生产装置工艺过程耦合性强、操作条件苛刻、物料易燃易爆，任何关键参数的异常偏离都会引起连锁反应，造成火灾、爆炸、中毒等重大事故^[1]。安全联锁系统属于保证过程不脱离安全范围的重要防护层，它对温度、压力、流量、液位这些关键工艺参数展开持续监控，在参数超出限定值的时候，会立刻启动紧急停车或者安全动作，成为化工装置安全运行的最后一道防线^[2]。但是近几年来，多起化工安全事故的调查表明，相当一部分事故是由安全联锁系统缺陷直接引起的——有的装置联锁触发后安全动作没有执行，有的联锁逻辑因为变更管理失控而误动作，有的联锁长期被摘除或者停用。问题背后的原因就是安全联锁系统的设计、实施、运维和变更管理等各方面的系统性缺陷^[3]。

2 安全联锁系统典型缺陷类型分析

2.1 硬件配置层面的缺陷

硬件配置是安全联锁系统达到安全目的的基础。目前化工连续生产装置硬件配置上的不足主要是单点联锁、仪表共用取压点、设备超期服役这三种情况。

单点联锁属于硬件配置上的主要问题。所谓单点联锁就是系统只用一个测量仪表或者一个信号源来作出联锁判断。虽然该种配置方式在成本上具有优势，但是在可靠性方面存在着明显的不足，当该仪表出现故障、信号漂移或者线路接触不良的时候，系统就会因为错误的信号而引发非计划停车，也可能会因为仪表失效而导致拒动^[4]。

从成因上来说，硬件配置缺陷主要是由于三个方面造成的，一是早期装置设计时对功能安全认识不够，没有考虑硬件冗余配置；二是成本压力之下部分企业改造时选择“能省则省”的配置方案；三是设备寿命周期管理缺失，没有建立仪表设备的定期更换计划^[5]。

2.2 逻辑设计与 SIL 定级层面的缺陷

安全联锁系统逻辑设计决定它在异常工况下怎样反应。目前一些装置的逻辑设计存在联锁条件设置不合理、SIL 定级与实施不一致、逻辑冗余不足等问题。

联锁条件设置不合理的情况多种多样。联锁阈值设置过松，导致参数严重偏离安全区后才会有动作出现，失去了保护的时机；联锁阈值设置太紧，经常造成无谓的停机，影响了生产连续性的保持。更为隐蔽的问题就是联锁逻辑和实际工艺需求脱节，随着装置运行年限的增加以及工艺条件的变化，原来的联锁逻辑已经不能满足目前的操作工况，但是企业没有对联锁逻辑进行同步调整。

逻辑设计缺陷深层次的原因是设计阶段没有对 HAZOP/LOPA 进行充分的分析，不能完全识别出联锁功能的安全需求；SIL 评估过程不规范，定级、验证环节相脱离；装置改造之后没有及时对逻辑进行重新评价和验证。

2.3 运维管理层面的缺陷

安全联锁系统可靠运行要靠规范的运维管理。但是目前许多企业运维管理方面存在着诸多问题，从而导致安全联锁系统实际可用性大大降低。

联锁长期被摘除或者停用是管理上最严重的问题之一。由于生产压力的推动，一些操作人员为了保证连续生产，在联锁频繁误动作的时候，会把联锁摘除或者强制置位。由于该化工企业芳构化装置燃料气切断阀存在机械故障，现场操作人员为了保证生产不受影响，私自将燃料气切断阀强制打开，造成联锁动作后加热炉仍然燃烧。更严重的是，该企业系统的报警功能一直都没有启用，操作台上所有的报警灯和蜂鸣器都是关闭的，直到联锁触发超过了 11 个小时之后才被发现。此类问题普遍出现的时候，安全联锁系统就成为摆设。

联锁投用状态与台账不符为运维管理中经常出现的问题。

有些企业存在画面显示联锁投入但是实际上并没有投用的虚显现象。国际焦化公司联锁排查时发现泡沫槽搅拌电机存在虚显“联锁投入”、锅炉脱硝系统画面与台账不符等缺陷。存在“纸面投用”的现象，导致联锁实际失效的问题没有被暴露出来，给安全生产带来很大的不确定因素。

联锁维护不到位也不可小视。仪表维护不及时，没有做好季节性维护工作（防冻、防潮等），都会造成仪表性能下降或者失效。部分企业对于联锁系统的定期测试只做表面工作，没有按照规定的测试频次、测试内容对联锁功能进行全方位的检验。

运维管理缺陷的根源是企业重生产、轻安全的惯性思维，将联锁管理放在产量指标之上，缺少有效的监督和追责机制，运维人员功能安全知识和技能不足，对联锁系统重要性认识不到位。

2.4 变更管理层面的缺陷

化工装置在长期使用过程中，不可避免地要进行设备更换、工艺调整、控制系统升级等变更操作。如果在变更过程中联锁系统管理失控，就会产生新的安全风险。

设备变更之后，联锁逻辑没有同步更新属于变化控制中最常见的一种情况。某化工企业进行芳构化装置改造时，没有按照设计要求采购专用制冷剂压缩机，而将异构化装置的富气压缩机挪作他用。设备更换之后，企业没有对安全仪表系统联锁逻辑做相应的调整，系统里依然存在原来的异构化装置联锁逻辑。结果在操作人员对压缩机进行正常的停机操作时，SIS逻辑将其当作设备故障，

变更管理缺陷的深层次原因就是企业把变更当作单纯的设备或者工艺的调整，忽略了变更对于联锁系统连锁的影响，变更管理制度缺少可操作性以及强制性的约束，变更后的验证环节也存在缺失，没有形成管理闭环。

3 安全联锁系统缺陷的系统性整改对策

3.1 单点联锁治理与硬件可靠性提升

就硬件配置而言，主要采取单点联锁的方式加以改善，从而加强系统的硬件稳定性。单点联锁治理的核心思想就是增加冗余配置，即把单一仪表的测量升级为多仪表冗余测量，用二取一、二取二或者二取三的方式来判断，防止由于单一仪表的故障造成误停车或者拒动作。海洋石油富岛有限公司实践证明，把联锁机制改成双信号同时触发才跳车的可靠控制，大大降低误停风险。对存在重大危险源或者高风险工艺的联锁回路进行优先性的改造。

仪表共用取压点和卡件的独立化改造也十分重要。对联锁回路中存在共用取压点、共用系统卡件等进行全部排查，逐步使重要的联锁回路物理隔离、独立配置，消除单点失效隐患。对确实不能实现物理独立的场景，采用逻辑上交叉验证、定期

测试的方式加以弥补。

建立仪表设备全生命周期更换计划，是形成一种硬件可靠性长效管理机制。根据仪表设备使用寿命和工作情况的不同，确定不同的更换周期，对超期服役的设备进行强制更换。加强仪表日常保养、季节性保养工作，在冬季防冻、夏季防高温方面采取相应措施，保证仪表一直保持良好的工作状态。

3.2 联锁逻辑优化与 SIL 全流程管控

针对逻辑设计以及 SIL 定级方面的不足，应该从逻辑结构改善和 SIL 全流程控制这两方面入手。

联锁逻辑优化应重点关注冗余度提升和阈值合理化。在重要的保护场合使用多重化的逻辑配置来提高系统的容错性以及可靠性。对联锁阈值进行系统的整理与改进，在保证安全的基础上兼顾生产连续性，防止因过于严格的阈值而造成频繁的误停车。对运行多年装置，根据 HAZOP/LOPA 分析结果重新评价联锁逻辑是否合理，不合理联锁逻辑进行修改。

SIL 全流程管控要形成定级、设计、实施、验证的闭环。首先要对 SIL 定级过程进行规范，保证 SIF 回路的安全完整性等级同工艺风险相适应。其次，在工程设计及设备选型时，依照定级结果挑选出具备相应 SIL 等级的仪表设备和控制系统。其次，在项目实施之后做规范的 SIL 验证，保证“实现的 SIL”符合设计要求。最后在装置运行期间及变更改造之后，对系统进行定期的 SIL 复评，保证系统一直符合安全要求。

3.3 联锁运维管理体系重构

针对运维管理层面的缺陷，要从制度建设、责任落实、闭环管理三个方面来重新构建联锁运维管理体系。

制度建设上要创建起完备的安全联锁管理制度，对联锁投用、摘除、恢复、变更、测试等各个环节的操作规程及审批程序做出规定。对联锁摘除实行“零容忍”管理，即关键装置的联锁保护必须全部投入运行，擅自摘除联锁的行为一经发现就追责。联锁触发之后要尽快查明原因并逐个消除触发条件，严禁强行复位。

责任落实上要创建起“专业负责、分级管控”的联锁管理责任体系。把电仪车间设为联锁系统的技术责任主体，各个工艺车间对联锁的属地进行管理。权责边界清晰化之后，每一个联锁管理工作都有具体的负责人，不会出现责任不清、推卸责任的现象。国际焦化公司实践证明，责任明确可以提高问题解决速度 30%—40%。

闭环管理要形成“排查、治理、复查”的全过程闭环管理体系。对每一个联锁问题都有明确的整改时限、责任人和验收标准，从而形成发现隐患到彻底消除的全过程控制。对联锁管理实行定期的回溯工作，跟踪联锁解除以及存在问题的处理情况。编写可视化联锁自查清单，把抽象的联锁检查要求变成直观的操作指引，达到快速核验、不漏项的目的。

3.4 变更管理闭环与联锁同步更新

对于变更管理方面的不足,应该把联锁系统当作变更管理的重要部分,创建起“变更—评价—更新—验证”的闭环管理流程。

变更前的联锁影响评价属于闭环的开始。任何涉及设备更换、工艺调整、控制系统升级的变更,在实施前必须做联锁影响分析,评价变更对联锁逻辑、仪表配置、SIL等级等各方面的影响。变更方案中应有联锁系统配套调整方案,保证变更后的联锁逻辑同新的设备、工艺条件相适应。

变更中联锁同步更新属于闭环环节。设备更换或者工艺调整实施之后,联锁逻辑、仪表配置、P&ID图、操作界面等也要进行相应的更新。联锁逻辑的修改必须经过严格的审批程序,修改后要对全部功能进行测试、验证。操作界面中设备编号、联锁状态等信息要和现场实际情况相一致,防止因为信息不一致而造成操作失误。

变更后的联锁验证就是闭环的终点,也是防止隐患带入运行的最后一道防线。变更完成之后,要对受到影响的联锁回路展开全部的功能测试和SIL验证,保证联锁系统安全功能符合

设计需求之后才能投入使用。变更相关所有文件(P&ID图、联锁逻辑图、操作手册等)及时更新归档,保证技术资料的完整性、准确性。

4 结语

化工连续生产装置安全联锁系统缺陷整改不能停留在碎片化的修补上,应该从硬件配置、逻辑设计、运维管理、变更控制四个方面展开系统性的体系重构。单点联锁治理、硬件可靠性提升解决的是“能不能动作”问题,联锁逻辑优化、SIL全流程管控解决的是“动作是否正确”问题,运维管理体系重构解决的是“长期能否保持”问题,变更管理闭环解决的是“变化后能否跟上”问题。四者互相联系、层层递进,一起组成了安全联锁系统从设计到退役全过程的功能安全保障体系。

技术层面的整改固然重要,但是如果没有管理制度的支持和人员能力的保证,那么整改的效果就很难持续下去。化工企业要把功能安全理念深入到企业安全管理文化当中去,依靠制度创建来固化整改成果,依靠培训教育来提高人员能力,依靠监督检查来保证制度执行,从而达成安全联锁系统由“被动应付”向“主动保障”的转变,给化工连续生产装置的长周期安全运行赋予有力的技术支撑和管理保证。

参考文献:

- [1] 张倩玉.化工生产中压力变送器零点漂移对安全联锁系统的直接影响[J].新潮电子,2026(3):208-210.
- [2] 俞洋,顾亚斌,刘涛.规范工艺报警强化联锁运行铸牢化工企业工艺安全"防护盾"[J].江苏应急管理,2025(8):46-47.
- [3] 刘国防.和利时DCS系统在化工生产安全联锁控制中的应用[J].信息记录材料,2026(6):183-185.
- [4] 武俊平,酒江波.化工企业全生命周期安全仪表管理存在的主要问题及改进策略[J].化工安全与环境,2025,38(8):39-44.
- [5] 张明.高温反应釜安全联锁系统在树脂助剂生产中的风险防控应用研究[J].化工安全与环境,2026,39(3):51-54.